



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní



# ODLÉVÁNÍ NETRADIČNÍCH MATERIÁLŮ VE VAKUU

## Bakalářská práce

Studijní program: B2341 – Strojírenství  
Studijní obor: 2301R030 – Výrobní systémy

Autor práce: **Bien Vo Van**  
Vedoucí práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechanical Engineering ■

# THE CASTING OF NON-TRADITIONAL MATERIALS IN A VACUUM

## Bachelor thesis

Study programme: B2341 – Engineering  
Study branch: 2301R030 – Manufacturing Systems

Author: **Bien Vo Van**  
Supervisor: Ing. Petr Zelený, Ph.D.



## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení	<b>Bien VO VAN</b>
Studijní program	<b>B2341 Strojírenství</b>
obor	<b>2301R030 Výrobní systémy</b>
zaměření	<b>výrobní systémy</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

### **Odlévání netradičních materiálů ve vakuu**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

Hlavním cílem této práce je otestovat odlévání jiných materiálů ve vakuu než jsou polyuretany a vosky. Vypracovat technologii lití těchto materiálů ve vakuu.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s technologií lití ve vakuu a zařízením dostupným na katedře (vakuová komora, temperovací pece).
2. Provést rozbor možných materiálů vhodných pro lití ve vakuu, mimo polyuretany a vosky.
3. Navrhnout postup otestování lití těchto materiálů.
4. Provést pokusná odlévání a vyhodnotit výsledek.
5. Stanovit vhodný postup lití netradičních materiálů ve vakuu.



Forma zpracování bakalářské práce:

Rozsah původní zprávy cca 40 stran textu včetně příloh. Bakalářská práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložena na CD (či DVD) k tištěnému svazku bakalářské práce.

Seznam odborné literatury:

MK TECHNOLOGY. *Vacuum casting chamber*. Dostupné z URL: <http://www.mk-technology.com>

Noorani, R.: *Rapid Prototyping: principles and applications*. John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-471-73001-7

Jacobs, P. F.: *Stereolithography and other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling*. ASME Press, 1996, ISBN 0-87263-467-1

Firemní katalogy a podklady

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Šafka - CxI



  
Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci dne 15. října 2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedeném lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ).  
Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

**TÉMA : ODLÉVÁNÍ NETRADIČNÍCH MATERIÁLŮ VE VAKUU**

**ABSTRAKT :** Tato práce nabízí informace o odlévání materiálů ve vakuu, zaměřeno na netradiční materiály jako jsou: pryskyřice, asfalty, nízkotavitelné kovy. Část řešení je zaměřena na popis technologie vakuového odlévání, který zahrnuje také výrobu formy i modelů. Měřením jednotlivých rozměrů modelů a posouzením vhodného postupu lití ve vakuu.

**KLÍČOVÁ SLOVA :** Odlévání, vakuum, rychlé prototypování.

**THEME : THE CASTING OF NON-TRADITIONAL MATERIALS  
IN A VACUUM**

**ABSTRACT:** This paper presents information on the development of casting materials in a vacuum in which some non-traditional materials are used, namely resins, asphalts, and low-melting metals. Part of the solution is focused on the description of the vacuum casting technology which also includes the manufacturing of moulds and models. By means of measuring various sizes of models and their assessment, there has been determined a suitable casting process in a vacuum.

**KEYWORDS:** Casting, vacuum, Rapid Prototyping.

Zpracovatel : TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

Dokončeno : 2014

Počet stran : 47

Počet příloh : 11

Počet obrázků : 18

Počet tabulek : 10

Počet modelů : 10

Počet graf : 2

nebo jiných příloh: 0

## **Obsah**

Seznam zkratk .....	7
1. ÚVOD .....	8
2. CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....	8
3. TECHNOLOGIE VAKUOVÉHO ODLÉVÁNÍ .....	8
3.1 Zařízení - vakuová komora, temperovací pece na katedře .....	9
4. LICÍ MATERIÁLY .....	11
4.1 Materiál k odlévání .....	12
4.1.1. Sádra .....	12
4.1.2. Epoxidová pryskyřice .....	13
4.2 Materiál formy .....	16
5. VÝROBA MASTER MODEL .....	17
5.1 Tvorby 3D modelu .....	18
5.2 Tisk master modelu .....	18
5.3 Příprava master modelu pro vytvoření formy .....	20
6. MĚŘENÍ ODLITKŮ .....	21
7. VÝROBA FORMY .....	23
8. POSTUP ODLÉVÁNÍ .....	26
8.1 Odlití modelů ze sádry .....	28
8.2 Odlití modelů z epoxidové pryskyřice .....	29
9. VYHODNOCENÍ VÝZKUMU .....	31
9.1 Vyhodnocení povrchu odlitků .....	31
9.2 Vyhodnocení přesnosti rozměrů odlitků .....	32
9.3 Vyhodnocení postupu lití .....	33
10. ZÁVĚR .....	34
Seznam použité literatury .....	35
Seznam příloh .....	36

## **Seznam zkratk**

MK	= Firma vyrábějící Vakuové komory pojmenována dle Michael Kügelgen
RP	= Rapid Prototyping
Bar	= Vedlejší jednotkou tlaku v soustavě SI (1 bar = 100 000 pascalů)
3D	= Three Dimensional (Trojdimenzionální)
PTC CREO	= Software design model (aplikaci pro modulární návrh výrobku)
ABS	= Akrylonitrilbutadienstyren
FDM	= Fused Deposition Modeling
mm	= Milimetr - jednotka délky
STL	= Stereolithography file



## **1. ÚVOD**

V minulosti k prezentaci naší myšlenky jsme používali pouze tužku a papír, ale byli jsme omezeni časem a směry, nicméně v dnešní době abychom prezentovali naše myšlenky co nejefektivněji a nejrychleji, musíme používat možnosti moderní technologie. V současnosti, naše představy jsou prezentovány především v elektronické podobě, nebo v poslední době způsobem tvorby reálného modelu, tímto způsobem můžeme jednoduše prezentovat a vysvětlit naše nápady.

Rapid prototyping proces umožňuje výrobcům produktů sledovat na konečný produkt. Tento proces díky RP zařízení nám umožňuje realizovat naše myšlenky do reálného modelu velmi rychle. Existuje mnoho metod rapid prototyping, a v našem případě je to metoda lití netradičních materiálů ve vakuu.

## **2. CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Hlavním úkolem bakalářské práce je výzkum vytváření prototypů technologií vakuového lití. Cílem je otestovat materiál technikou vakuové tváření a vynechat při tom běžné materiály jako jsou vosky a polyuretanové materiály. Ty se používají při odlévání ve vakuu běžně. Tato práce vybere materiály méně používané (Sádra, Epoxidová pryskyřice).

## **3. TECHNOLOGIE VAKUOVÉHO ODLÉVÁNÍ**

Technologie lití ve vakuu je celosvětově nejrozšířenější metodou výroby prototypů. Výrobky budou vyráběny technologií vakuového gravitačního odlévání.

Tato metoda je moderní technologií pro výrobu silikonových forem a prototypových dílů. Vakuové lití umožňuje výrobu tvarově velmi složitých, tenkostěnných modelů při přesném dodržení rozměrů master modelu, za nízkou cenu v porovnání se vstřikováním plastů (MCAE Systems s.r.o., 2013). Vakuové lití slouží k výrobě malých sérií prototypových dílů z polyamidových nebo polyuretanových materiálů, které se svými vlastnostmi velmi podobají materiálům sériových dílů. Lití se většinou provádí do silikonových forem vyrobených ze silikonových kaučuků, které se snadno zpracovávají

a vytvrzují. Z praktického hlediska je důležitá zejména jejich pružnost, díky ní se z formy snadno uvolňují i komplikované odlitky. Další pozitivní vlastností je průsvitný vzhled, který umožňuje přesné rozříznutí formy dle označených dělicích rovin na master modelu. Silikony mají velice nízké smrštění, dobrou rozměrovou stabilitu, jsou velmi houževnaté a mají středně vysokou tvrdost. Formy ze silikonových kaučuků lze použít pro odlévací hmoty na bázi polyuretanů, epoxidů, polyesterů a silikonů. Dále se do těchto materiálů mohou odlévat i nízkotavitelné slitiny, sádra, keramika, atd. Silikon je dvousložkový materiál složený ze základní složky, která se po promíchání s vytvrzovací složkou vytvrdí při pokojové teplotě adiční reakcí. Proces vytvrzení lze urychlit temperováním nebo urychlovači. [1]

#### **přehled o procesu :**

-Nejprve je vyroben tzv. master model – k jeho výrobě používáme 3D tisk pomocí technologie FDM. Jako master model se však může použít díl dodaný zákazníkem.

-Master model se zalije do silikonu a po jeho vyjmutí je vytvořena forma pro lití, která je vícenásobně použitelná.

-Lití probíhá ve vakuové komoře – pro lití je použit speciální dvousložkový materiál na bázi netradičních. [2]

### **3.1 Zařízení - vakuová komora, temperovací pec na katedře**

MK vakuové licí systémy jsou zařízení, které umožňují efektivní, rychlou a velmi přesnou výrobu komplexních plastových prototypových dílů. Tento systém byl navržen pro malé firmy, univerzity a školicí střediska. Vyloučením elektroniky a dalších kosmetických prvků se stal MK - Mini kompaktním a vysoce výkonným zařízením za rozumnou cenu. Tento systém je dodáván spolu se dvěma temperovacími pecemi a základní sadou nástrojů. [3]

Vakuové komory jsou vhodné k rychlé výrobě součástí požadovaných dílů. Například k vytváření forem a zároveň odlévání do nich. Nejčastěji zde používají různé druhy pryskyřic, v našem případě se bude jednat však o sádra, cín a silikonový kaučuk. V pracovním prostoru dochází k promísení materiálů a odsátí vzduchu, který by nám

znemožnil výrobu dílu v požadované kvalitě. Popis jednotlivých prvků je uveden níže společně s tabulkou technických parametrů.



*Vakuová komora*



*Komora a temperovací pece*

Obr. 1.: Vakuová komora MK mini a temperovací pece

-Vakuový lící systém firmy MK pro Rapid Prototyping a Rapid Tooling.

Maximální rozměry formy [mm]	450 x 470 x 400
Příkon [kW]	0,9
Hmotnost zařízení [kg]	250
Maximální hmotnost odlitku [g]	1000
Vnější rozměry [mm]	640x600x100
Průtok vzduchu [m <sup>3</sup> ]	25
Velikost vakua [mbar]	≤0,5

Tab. 1.: Technické parametry vakuové komory MK mini. [3]

## **4. LICÍ MATERIÁLY**

Volba licího materiálu je jedním z nejdůležitějších faktorů pro dosažení odlitku požadovaných vlastností. Licí materiály lze podle [6] rozdělit do dvou základních skupin, které jsou vymezeny jejich nejvýznamnějšími vlastnostmi. Tyto vlastnosti souvisí s přípravou licího materiálu do slévatelného stavu a následným vytvrzením odlitku. Dle toho se tedy dělí na materiály:

- tvrditelné – pryskyřice
- teplem tavitelné - vosky, kovy, asfalty ...

### **A) Licí materiály tvrditelné:**

V oblasti prototypového lití jsou nejčastějšími zástupci této skupiny tvrditelné pryskyřice. Nejdůležitějším znakem těchto tvrditelných materiálů je ten fakt, že jsou v normálním stavu tekuté. Nemusí se tedy ve většině případů před použitím nijak upravovat nebo ohřívat, jsou tedy ihned použitelné ke zpracování. Většinou pouze dochází k smíchání jednotlivých složek. Bezprostředně po odlití nastává fáze vytvrzování odlitku. Vytvrzením odlitek ztuhne a poté již není možné zpětně změnit skupenství na kapalné. Slovo vytvrzení tak představuje určitou chemickou reakci, díky které dojde ke změně skupenství licího materiálu. Mezi nejpoužívanější způsoby dosažení reakce patří např. zvýšení teploty, působení katalyzátoru atd., opět v závislosti na použitém materiálu. [2]

### **B) Licí materiály teplem tavitelné:**

Jsou materiály, které je nutno před odlitím upravovat. V tomto případě se jedná o změnu skupenství materiálu z pevného na tekuté. Toho se dosáhne na teplotu, která přesahuje teplotu tavení daného materiálu. Jakmile je veškerý objem materiálu v tekutém stavu, je možné ho odlévat. Vytvrzovací proces nastává za postupného snižování teploty až na teplotu pokojovou.

U teplem tavitelných materiálů je nutné myslet na smrštění objemu v průběhu chladnutí. Tento jev lze zmírnit předeřtáním formy na stejnou teplotu, jakou má odlévaný materiál. Materiál se při styku s povrchem formy tak prudce neochlazuje jako v případě použití formy, která není ohřátá. [2]

## 4.1 Materiál k odlévání

Zatím nejpoužívanějším materiálem jsou vícesložkové pryskyřice, avšak vhodné jsou i další materiály jako jsou např. nízkotavitelné kovy, sádra.....

### 4.1.1. Sádra

Sádra je univerzální materiál a podle použití patří do několika skupin pomocných hmot: otiskovacích, modelových, formovacích a v dalších je obsažena. I když se v současnosti k otiskování už téměř neužívá, získala zato zcela univerzální postavení jako materiál užívaný k přípravě všech typů situačních modelů a lisovacích forem na a bazálních plastů. [4]

sádra se vyrábí z minerálu sádrovce pálením. Sádrovec je síran vápenatý, který obsahuje v molekule vázanou vodu. Sádrovec se pálí při různých teplotách, většinou při 130 až 300 °C. štukatérská sádra, se získává pálením sádrovce, rozemletého na prášek, v železných kotlích s míchadlem při 130 až 160 °C. Sádrovec ztrácí postupně vodu, z původních dvou molekul klesne její obsah na polovinu molekuly obvykle při 130 °C. Dalším zvýšením teploty nad 150 °C polohydrát mění v téměř bezvodý síran vápenatý, tzv. rozpustný anhydrit neboli pálenou sádru.

Vlastnosti sádry, zejména doba tuhnutí, závisí na teplotě, při níž byla pálena, a na jemnosti mletí. Jemně mletá sádra tuhne rychleji. Nejrychleji tuhne právě sádra štukatérská, pálená při 130 až 200 °C.[6]

Složení:

V základním systému  $\text{CaSO}_4/\text{H}_2\text{O}$  je známo pět různých krystalických látek:

1. Sádrovec - dihydrát (dvojhydrát)  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
2. Sádra - hemihydrát (polohydrát)  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$
3. Rozpustný síran vápenatý (rozpustný anhydrit, polohanhydrit)  $\text{CaSO}_4$
4. Přírodní síran vápenatý (přírodní anhydrit)  $\text{CaSO}_4$
5. Vysokoteplotní anhydrit  $\text{CaSO}_4$

První čtyři látky, nebo fáze, se vyskytují za normální teploty, pátá jen při vysokých teplotách nad 1180 °C. [4]

- Používání Sádra modelářská

Kittfort sádra modelářská je určena pro vodoinstalaci, elektroinstalační, stavební, topenářské a modelářské práce:

Odstín	Bílý
Podklad	Zdivo, omítky, sádrokartón
Aplikace	Špachtle
Aplikační teplota	Teplota podkladu i prostředí musí být nad +5 °C
Mísicí poměr	1 kg sádry / 650 ml vody
Čas na zpracování	12 min./při 20 °C
Povrchové zaschnutí	12 min., brousitelný po 60 min./vrstva 0,5 - 10 cm
Povrchová úprava	Přetíratelný běžnými nátěrovými hmotami po 2 hod
Ředidlo a mytí pomůcek	Voda
Skladování	+5 °C až +25 °C v suchu

Tab. 2.: Technické parametry modelářské sádry [8]

#### 4.1.2. Epoxidová pryskyřice

Epoxidová pryskyřice je polymerní materiál syntetického původu. Patří mezi tzv. reaktoplasty. Jedná se o pryskyřičné látky s více než jednou epoxidovou vazbou. Ty vynikají velmi dobrou adhezí k celé řadě materiálů a po vytvrzení (o vytvrzení více níže) dalšími podstatnými vlastnostmi: chemickou odolností, tvarovou stálostí (včetně malého smrštění při vytvrzení) a dalšími vlastnostmi typickými pro syntetické pryskyřice – dobrou tepelnou odolností (zvláště v porovnání s termoplasty) a tvrdostí.

- Nevytvrzená epoxidová pryskyřice je viskózní lepkavá kapalina nebo křehká pevná látka (čím vyšší molekulová hmotnost, tím vyšší teplota tání), ve finálních výrobcích tak buď dochází k jejímu vytvrzení (například lepidla), nebo již vytvrzená je (kompozitní materiály). K vytvrzení dochází nejčastěji přidáním tzv. tvrdidla a to buď za pokojové, nebo zvýšené (až 200°C) teploty. Jako tvrdidla se nejčastěji používají polyaminy (např. DETA), anhydridy polykarboxilových kyselin, polythioly nebo tzv. formaldehydové pryskyřice (fenolické, močovinové nebo malaminové). [5]

Licí Epoxidová pryskyřice lze podle [6] rozdělit do dvou skupin:

- Základní epoxidové pryskyřice: neobsahují žádné přísady, jako plniva, zvláčňovadla nebo tvrdidla. Mají jen omezené použití.
- Modifikované epoxidové pryskyřice: dělí se na neplněné a plněné.

Vybíráte epoxidový MC1163+W340

MC1163+W340 licí dvoukomponentní epoxidový systém plněný hliníkem a směsí minerálních obrobitebných plniv.

Systém se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi a uzavřeným neporézním leštitelným povrchem a dobrou houževnatostí. Teplotní odolnost systému dle následného temperačního cyklu do 140°C (s tvrdidlem W340) se používá v oblasti výroba slévárenských modelových zařízení.

Vlastnost/ veličina	MC1163	W340	Směs
Barva	Šedá	Transparent.	Šedá
Zápach	Bez zápachu	Slabý zápach	po vytvrzení bez zápachu
Viskozita dynamická (mPa.s)	80000-140000	45-55	10.000-16.000
Hustota při 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1,787-1,82	0,92-0,94	1,66-1,70
Zpracování MC1163+W340			
Směšovací poměr komponent		Hmotnostní díly	Objemové díly
A : B		100 : 11	100 : 21
Doba zpracovatelnosti po smíchání		100 – 120 min / 23°C (50mm tl., 200ml směsi)	
Max.exotermická reakce při vytvrzování (50mm tloušťka, objem 200ml)		56 - 68°C	

Vytvrzení při 23°C	16 - 20 hod
Max.doporučená tl. Vrstvy	20-25mm
Vlastnosti po vytvrzení: 24 hod/23°C + 15 hod/60°C	
Vlastnost	Hodnota MC1163+W340
Barva	Šedá
Obrobitelnost	Vynikající
Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	1,65-1,70
Tvrdost při 23°C(Shore D)	89-93
Teplota skelného přechodu tg  - 48hod/23°C(°C) - 15hod/60°C(°C) - 4hod/100°C(°C) max. 15hod/150°C(°C)	  55-60 90-98 122-130 129-135
Tepelná vodivost(W/mK)	0,87-0,97
Pevnost v ohybu(N/ mm <sup>2</sup> )	62-72
Protažení do lomu(%)	1,0-1,4
Modul pružnosti E (z ohybové zkoušky) (N/ mm <sup>2</sup> )	6900-7700
Tahové napětí(N/ mm <sup>2</sup> )	32-40
Tlakové napětí(N/ mm <sup>2</sup> )	95-105
Skladování(°C)	15 – 30

Tab. 3.: Technické parametry použité epoxidové pryskyřice [9]



## 4.2 Materiál formy

Další součástí práce bylo vyrobit odlité součásti za pomoci silikonové formy. Pro výrobu silikonových forem a jader byl použit silikon kaučuk.

Silikonové kaučuky patří do skupiny elastomeru. Některé z nich jsou zvláště výhodné pro výrobu pružných forem. Chemicky jsou to většinou dimetylsiloxany plněné anorganickými plnivými, např. kysličníkem titaničitým, zinečnatým, hlinitým, sráženým kysličníkem křemičitým, uhličitanem vápenatým, kaolínem dalšími. Vyrábějí se ve formě kapalin, past, disperzí, tmelů a krepů (obdoba přírodních krepů, což je forma přírodního kaučuku). Silikonové kaučuky získávají výhodné vlastnosti vulkanizací, stejně jako kaučuky přírodní nebo syntetické. Místo síry vytvoří však mezi jednotlivými lineárními řetězy příčné spojení metylénové můstky. Silikonové kaučuky vulkanizují za zvýšené teploty a tlaku.

V posledních letech byly vyrobeny silikonové kaučuky, které je možno vulkanizovat na pružné elastomery za normální teploty přidávkou síťovadel a katalyzátorů. Označují se obvykle jako silikonové kaučuky vulkanizovatelné za studena. Tyto druhy jsou pro výrobu pružných forem nejvhodnější.

Jako katalyzátorů se používá organických sloučenin kovů alkylnicičitanů, alkyltitanátů, některých aminů a amonných solí, síťovadla je polyetylsilikáty.

Vulkanizační činidla se do kaučuku vmíchají v množství 1 až 4% tak, aby ve směsi nebyly vzduchové bubliny. Životnost směsí za normální teploty se pohybuje v rozmezí pěti minut až několika hodin, podle druhu síťovadla a druhu a množství katalyzátoru.

Všechny typy silikonového kaučuku mají přibližně stejné vlastnosti, pouze pevnost v tahu a průtažnost je u kaučuků vulkanizovatelných za studena o něco nižší. Odolávají trvale teplotám do +150 °C, některé druhy dokonce do +180 až 250°C. [6]

Pro výrobu modelů z plastických materiálů jako jsou právě sádra a pryskyřice epoxidová je možno použít silikonový kaučuk od firmy Dow Corning Europe S.A. Tento produkt na výrobu forem pro prototypy je prověřený dlouhodobým používáním na katedře výrobních systémů. Byl použit silikonový kaučuk pro výrobu forem a prototypů XIAMETER(R) RTV-4234-T4 LIQUID SILICONE RUBBER BASE. Má vysokou pevnost a je vhodný pro výrobu pryžových forem. Vyvinut pro prototypový design a výrobu nástrojů, zejména pro rapid prototyping.

Základní Složka	
Fyzikální forma	Viskózní kapalina
Barva	Bezbarvý
Zápach	Některé zápach
Specifická hmotnost při 25 ° C [ g/m <sup>3</sup> ]	1,1
Viskozita [mPas]	70000
Bod varu [°C]	> 35
Lineární smrštiteľnost [%]	0,1
Bod vzplanutí [°C]	> 150
Zápalná teplota [°C]	> 300

Tab. 4.: Technické parametry daného silikonového kaučuku. [7]

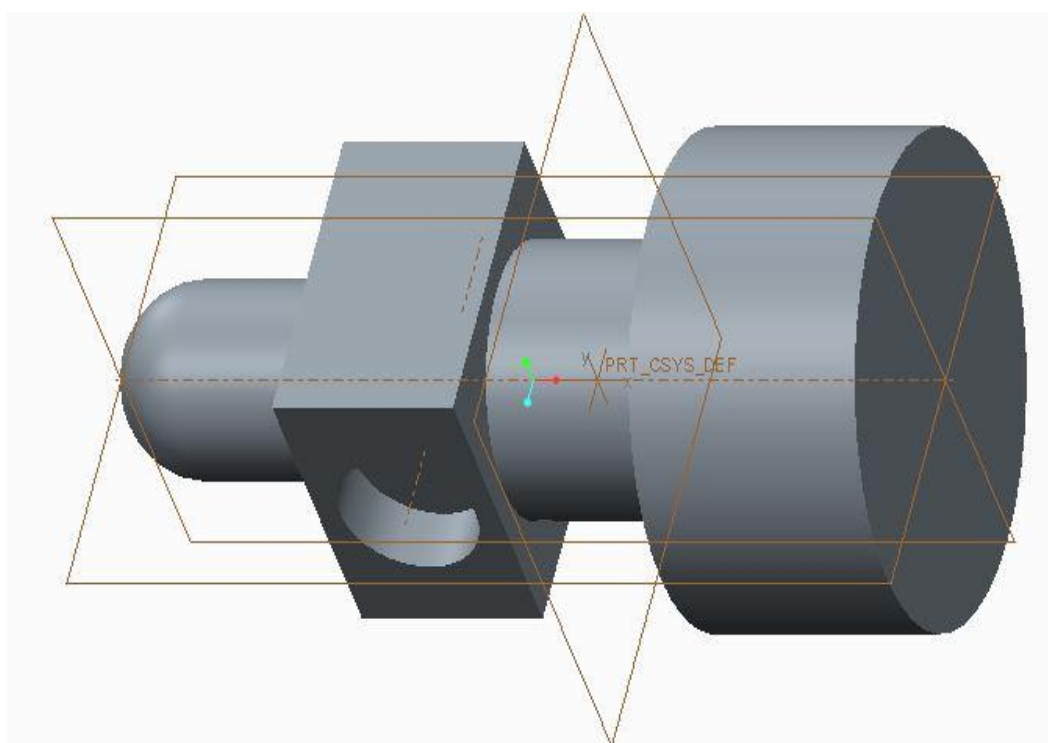
## **5. VÝROBA MASTER MODEL**

Pro výrobu silikonové formy i odlitků je potřeba master model. Měl by být takových rozměrů, aby se dal lehce zaformovat do formy o kompaktních rozměrech.

Pracovní prostor na stroji Objet500 Connex je další možný určující faktor. Na základě těchto předpokladů byl volen maximální průměr modelu 100 mm a délka 100 mm.

## **5.1 Tvorby 3D modelu**

Návrh modelu byl vytvořen v software PTC CREO 2.0. Volím průměr modelu 45 mm a délka 90 mm.



Obr. 2: Model v softwaru PTC CREO 2.0

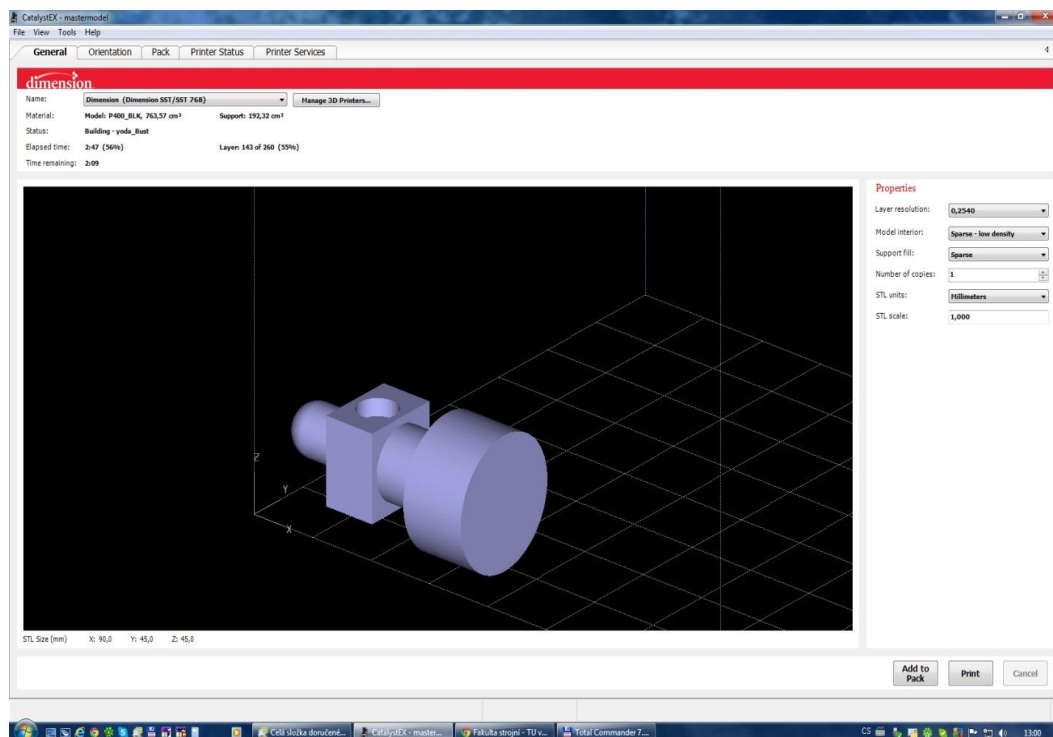
## **5.2 Tisk master modelu**

Model byl převeden do trojúhelníkové sítě polygonů formátu \*.stl. Následně jsem 3D model importoval do programu CatalystEX 4.2, který slouží jako obslužný software pro 3D tiskárnu Dimension sst768. Tento program je určen především ke snadnému načtení vstupních dat a rychlému nastavení parametrů tisku.

Program umožní ihned po načtení vstupních dat potřebných k tisku, jejich nastavení v podobě několika důležitých náležitostí, jako jsou tloušťka vrstvy (0,25mm), výplň

modelu (Solid), typ podpor (Sparse), počet kopií (3 ks), STL jednotky (mm) a STL měřítko (1:1).

Dalším krokem je zvolení orientace modelu v tiskové komoře. Model se může libovolně natáčet podle osy x, y, z. Orientace modelu byla zvolena tak, aby byla co nejmenší spotřeba podpůrného materiálu. Po zvolení orientace modelu v komoře, následuje rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy. V tiskové komoře se dá nastavit přesná pozice modelu. Nyní jsou zároveň přístupné informace o délce tisku a objemu spotřebovaného materiálu. Vyráběný model potřeboval pro svou konstrukci  $763,57 \text{ cm}^3$  materiálů (stavebního a podpůrného).



Obr. 3: Umístění modelu v tiskové komoře.

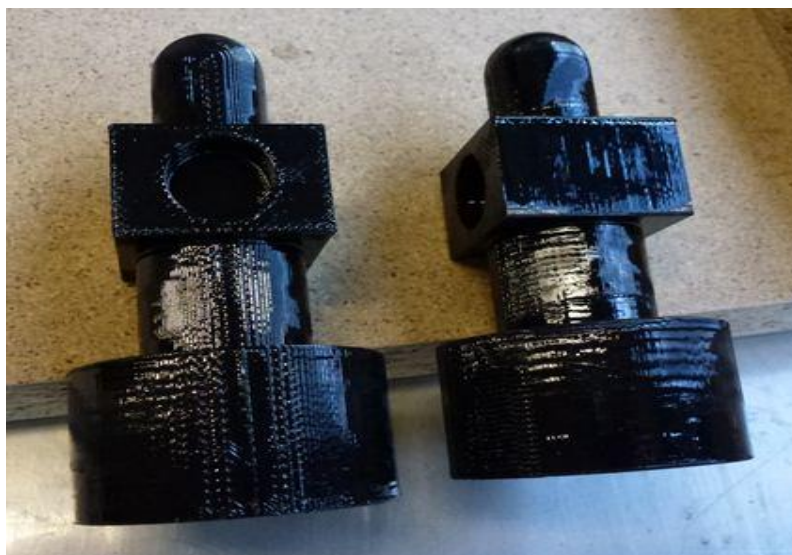
Další fáze je processing, tedy samotný tisk modelu metodou FDM v tiskárně Dimension. Tisk trvá cca 7 h 59 minut. V tiskové komoře dosahuje teplota cca  $75^{\circ}\text{C}$ , přičemž extruzivní trysky dosahují teplot cca  $270^{\circ}\text{C}$ . Pro fixaci modelu k podložce je nejdříve vytvořena základna z podpůrného materiálu. Následně jsou na tuto základnu nanášeny vrstvy stavebního materiálu (tiskový materiál ABS), do té doby, než je model hotov.



Obr. 4: model v tiskové komoře ihned po dokončení tisku.

### **5.3 Příprava master modelu pro vytvoření formy**

Ve fázi postprocessingu je nejprve nutné odstranit z modelu podpurný materiál. Odstranění se provádí nejdříve mechanicky a poté i chemicky v lázni. Na závěr se na povrch nanese vrstva Methyl – ethylkeoton čistý ( $C_4H_8O$ ) pro zacelení pórů a hladší povrch.



Obr. 5: hotové modely pro vytvoření formy.

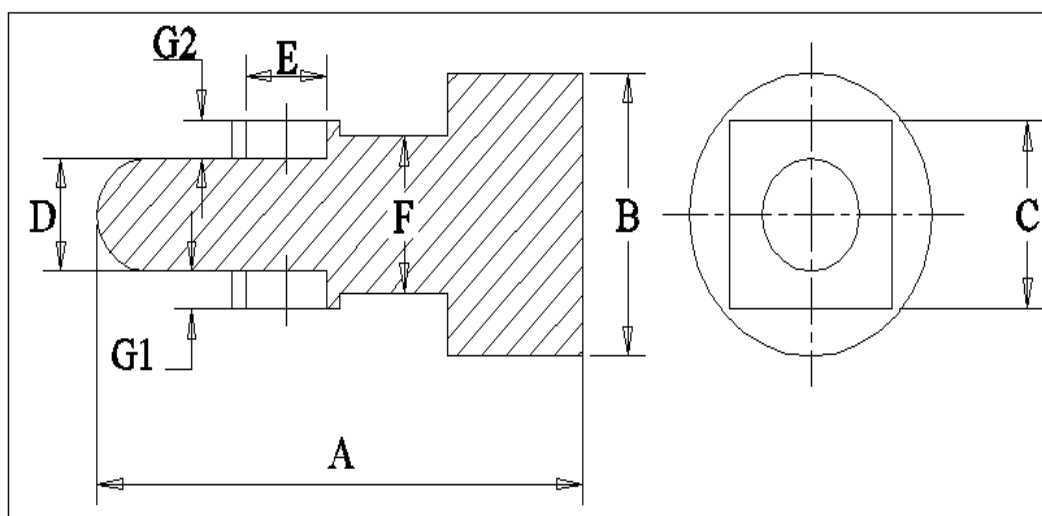
## 6. MĚŘENÍ ODLITKŮ

Nejdůležitější je určit různé parametry pro rozdílnost rozměrů odlitých modelů od master modelu. Od toho můžeme zhodnotit smrštění materiálu při odlévání. Měření bylo prováděno za pomoci posuvného měřítka.



Obr. 6.: Posuvné měřítko

Měření se provedlo na každém modelu takto :



Obr. 7.: Měřené rozměry

Pro ověření některých vlastností, jako je zatékavost a schopnost materiálu k vyplnění otvorů, je model složen z různých tvarových ploch. Měření na vytištěném modelu bylo provedeno stejným postupem jako u odlitků. Každý rozměr se měřil třikrát na stejném

místě a vzala se průměrná hodnota pro získání co nejpřesnějších výsledků. Konečné hodnoty byly vzaty a porovnány s master modelem.

Tab. 5.: Naměřené hodnoty master model

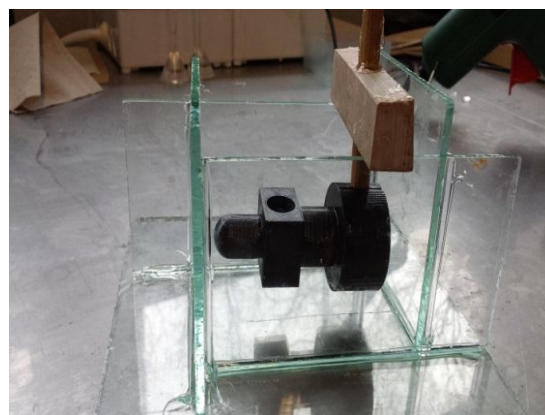
	1.měření [mm]	2.měření [mm]	3.měření [mm]	Průměrná hodnota [mm]
A	89,98	89,97	89,99	89,980
B	44,98	44,96	44,98	49,973
C	29,98	29,99	30	29,990
D	17,99	18	17,98	17,990
E	14,99	14,96	14,97	14,973
F	24,97	24,98	24,99	24,980
G1	5,98	5,97	5,97	5,973
G2	6,19	6,20	6,21	6,20

## 7. VÝROBA FORMY

Aby vytvořené spoje správně držely, sestavili jsme rám ze skleněných tabulí, které jsme napřed odmastili. Sklo bylo zvoleno z důvodu potřeby dokumentace výroby formy. Skleněné tabule jsme spojili za pomoci lepící pistole a vhodného tavného lepidla. Přilepení dřevěného kolíku bylo provedeno obdobně. Tento kolík představuje budoucí vtokový kanál.



Obr. 8.: Lepení rámu formy.



Obr. 9.: Ustavení polohy modelu.

Následuje mísení připravených složek formy, které jsme předem odvážili na požadovaný poměr. Tuto směs jsme pečlivě promíchali, abychom zajistili odpovídající kvalitu materiálu formy.



Obr. 10.: Smíchání silikony ve vzduchu.



Připravený silikonový kaučuk jsme umístili v dostatečně velké nádobě, která se vejde do pracovního prostoru vakuové komory. Také však musíme brát ohled na to, že bude prováděno odvzdušnění formy, při kterém může nabýt objem materiálů až na 6 násobek původního objemu.

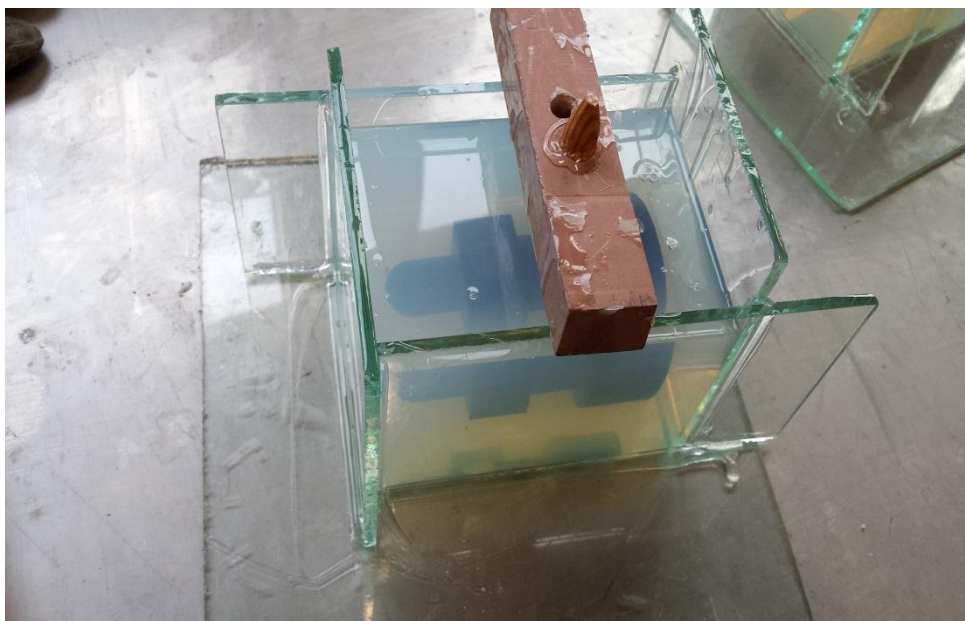
Výše uvedená směs se vloží k odplynění do komory MK mini. Odplynění probíhá kvůli získání vhodné formy a k zamezení vzniku bublin v dutině formy.

Po odplynění se nádoba vyjme se směsí z vakuové komory. Nyní je směs připravena k výrobě formy.



Obr. 11.: materiálu formy po odplynění ve vakuu.

Posledním krokem je nalití silikonového kaučuku do rámu formy s master modelem. Po úplném vyplnění prostoru ohraničeným rámem bude forma tuhnout. Běžná doba tuhnutí těchto forem při pokojové teplotě je přibližně 12 hodin. Tuto dobu je možné urychlit použitím vhodné pece, kde je možnost zkrátit chladnutí na 2 hodiny při teplotě 50°C. Při výrobě naší formy však vzniklo několik bublin během vyplňování tvaru, proto volíme časově náročnější 12ti hodinovou variantu. Pomalejším chladnutím budou bubliny postupně stoupat k povrchu, kde se odstraní z objemu formy.



Obr. 12.: Úplné vyplnění formy.

Po 12ti hodinové čekání, můžeme odstranit přetoky. Nyní zbývá jen rozdělit formu na dvě části za pomoci modelářského skalpelu. Při provádění řezů je důležité brát ohled na následující správné ustavení částí forem, proto provádíme řezy různě zakřivené.



Obr. 13.: Formy po odstranění skla



Obr. 14.: Rozdělená forma

## 8. POSTUP ODLÉVÁNÍ

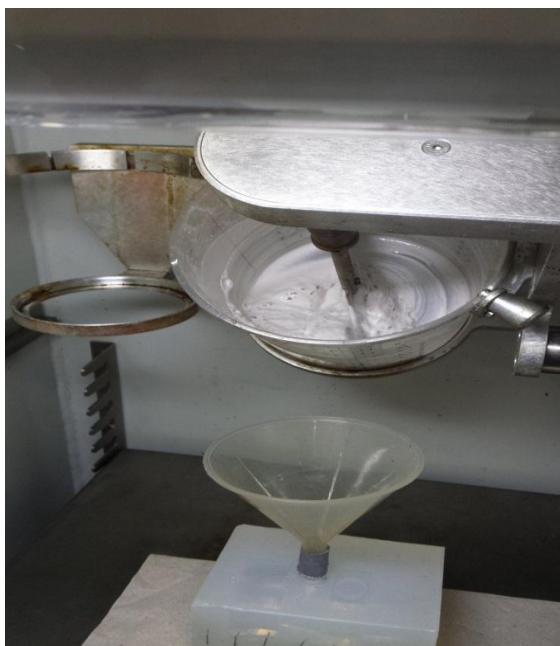
Před odléváním bylo nejprve nutno připravit jednotlivé potřebné komponenty a to materiály, pec, komoru a formu.

Odlévání se provádělo ve dvou skupinách, první byla při pokojové teplotě bez použití vakua.

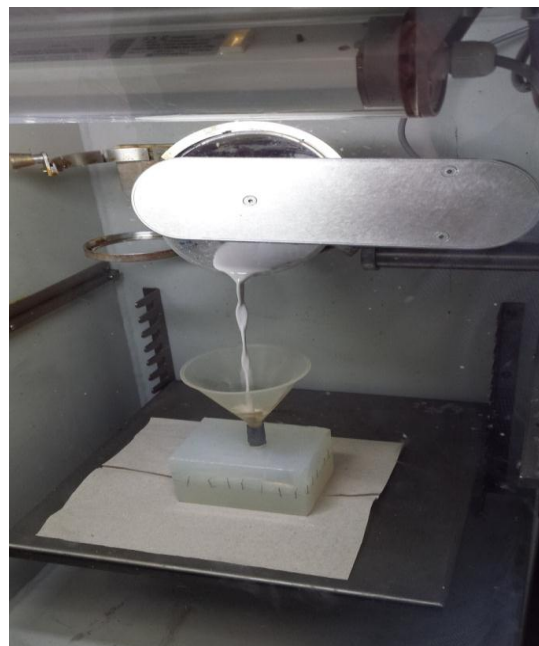


Obr. 15.: Lití materiálu do formy.

Druhá je odlévání při teplotě pokojové s použitím vakua. To se provádělo tak, že se vložila forma i materiál do vakuové komory a při míchání materiálu se zároveň pomocí pumpy odsával vzduch z pracovního prostoru komory. Po promíchání materiálu v kelímku, při tlaku v komoře -0,95 bar, po vhodné době, kdy vzduchové bubliny byly vysáty z materiálu, materiál byl nalit do formy. Na níže uvedených obrázcích je vidět tento postup.



Obr. 16.: míchaní materiálu ve vakuu.



Obr. 17.: odlévání materiálu do formy.

Po odlití se vyndaly jednotlivé silikonové formy a díly se nechaly vytvrdit po vhodnou dobu při pokojové teplotě (obvykle do druhého dne). Po té se opatrně vyjmuly již připravené odlitky, které se dále měřily.

Z každého materiálu bylo vždy vyrobeno 5 kusů modelů.



Obr. 18.: Vytvrzování odlitku při pokojové teplotě.



## 8.1 Odlití modelů ze sádry

Příprava materiálu: sádra a voda. Míchací poměr sádry s vodou 0.65 : 1. Odlití ze sádry proběhlo ve tři etapách po pěti odlitcích. První etapa bez vakua ( odlitky 1.1, viz příloha č. VII a II) byla zároveň úvodní etapou výzkumu.

Tab. 6.: Procentuální rozdíl rozměrů odlitku z sádry č. 1 (23 °C) a (90 °C)

Rozměr	Procentuální rozdíl rozměrů <sup>2</sup> za	
	Chladnutí při pokoj. teplotě	Chladnutí v peci
A [mm]	0,448	0,529
B [mm]	0,044	0,073
C [mm]	0,156	0,411
D [mm]	0,352	1,223
E [mm]	0,932	1,021
F [mm]	2,695	2,228
G1 [mm]	4,905	6,021

Druhá etapa proběhla ve vakuu (lití). Smíchání mimo vakuovou komoru (odlitek 1.2, viz příloha č. VII a III ).

Tab. 7.: Procentuální rozdíl rozměrů odlitky z sádry č. 2 (23 °C) a (90 °C)

Rozměr	Procentuální rozdíl rozměrů <sup>2</sup> za	
	Chladnutí při pokoj. teplotě	Chladnutí v peci
A [mm]	0,433	0,445
B [mm]	0,141	0,281
C [mm]	0,434	0,589
D [mm]	0,907	1,093
E [mm]	0,821	1,111
F [mm]	0,814	1,014
G1 [mm]	4,347	4,068

<sup>2</sup> Kladné hodnoty rozdílů představují zmenšení rozměru odlitku oproti master modelu.

Třetí odlití se provedlo ve vakuu (promíchání i lití) ( odlitky 1.3, 1.4, 1.5, viz příloha č. VIII, IX a IV).

Tab. 8.: průměrný procent. rozdíl rozměrů odlitku ze sádry č. 3, 4, 5 (23 °C) a (90 °C)

Rozměr	Procentuální rozdíl rozměrů <sup>2</sup> za	
	Chladnutí při pokoj. teplotě	Chladnutí v peci
A [mm]	0,418	0,348
B [mm]	0,074	0,154
C [mm]	0,334	0,445
D [mm]	0,741	0,907
E [mm]	0,465	0,754
F [mm]	0,787	0,974
G1 [mm]	3,845	3,119

## 8.2 Odlití modelů z epoxidové pryskyřice

Příprava materiálu: dvoukomponentní epoxidová pryskyřice MC1163 + W340, míchací poměr hmotnostní díly 100 : 11.

Licí proces obdobný jako u sádry, první odlití mimo komoru při atmosférickém tlaku (odlitek 1.6, viz příloha č. IX a V ).

---

<sup>2</sup> Kladné hodnoty rozdílů představují zmenšení rozměru odlitku oproti master model.

Tab. 9.: Procentuální rozdíl rozměrů odlitku z epoxidové pryskyřice č. 1

Rozměr	Procentuální rozdíl rozměrů <sup>2</sup> za
	Chladnutí při pokoj. teplotě
A [mm]	0,437
B [mm]	0,851
C [mm]	0,878
D [mm]	1,686
E [mm]	1,956
F [mm]	0,613
G2 [mm]	0,698

Ostatní čtyři odlitky se odlévaly ve vakuu a směs se smíchala mimo komoru ručně (z důvodu vysoké hustoty směsi). Všechny odlitky se vytvrzovaly při pokojové teplotě po dobu 6 až 8 hodin (odlitek 1.7, 1.8, 1.9, 1.10. Viz příloha č. IX, X, XI a VI ).

Tab. 10.: průměrný procent. rozdíl rozměrů odlitku z epoxidové pryskyřice č. 2, 3, 4, 5

Rozměr	Procentuální rozdíl rozměrů <sup>2</sup> za
	Chladnutí při pokoj. teplotě
A [mm]	0,251
B [mm]	0,379
C [mm]	0,651
D [mm]	1,042
E [mm]	0,353
F [mm]	0,351
G2 [mm]	0,201

---

<sup>2</sup> Kladné hodnoty rozdílů představují zmenšení rozměru odlitku oproti master modelu.

## **9. VYHODNOCENÍ VÝZKUMU**

Výsledky odlévání jsou vyhodnoceny podle těchto hledisek: srovnání rozdílnosti rozměrů odlitků oproti master modelu, kvalita povrchu a proces lití jednotlivých odlitků.

### **9.1 Vyhodnocení povrchu odlitků**

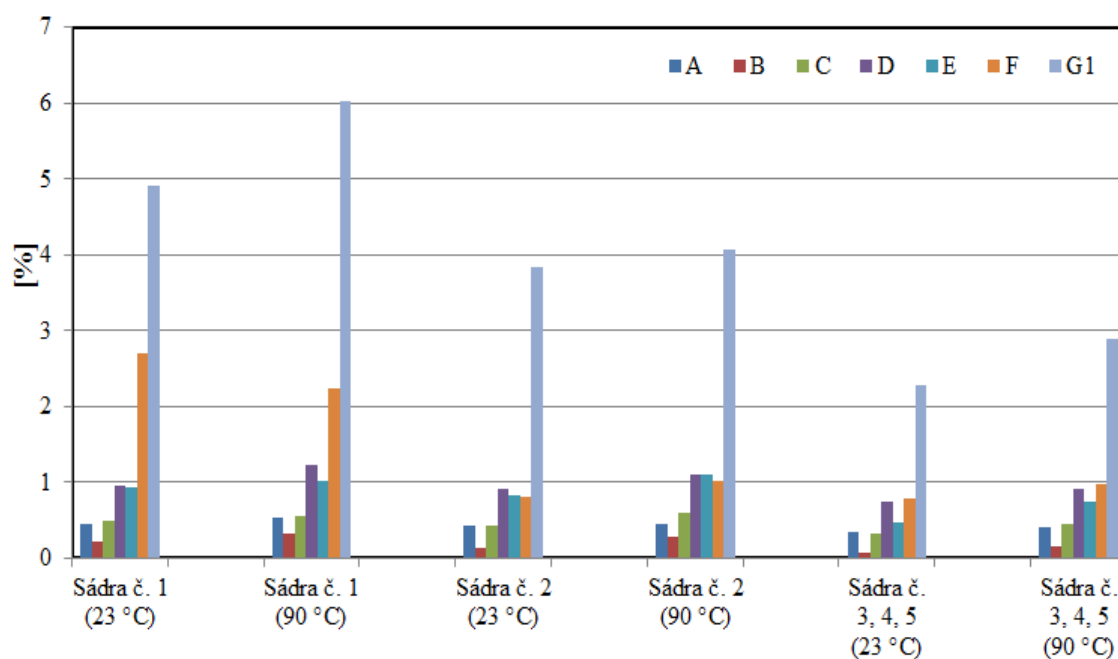
Dosažení výsledků bylo provedeno na principu zjištěných závad na modelech. Z vad odlitků byly vybrány 2 nejčastější: Výskyt viditelných povrchových vzduchových bublin a neúplného odlití částí modelů.

Pro experimenty ze sádry, můžeme pozorovat, že se bubliny tvořily. Na obrázku 1.1 v příloze VII jsou vidět bubliny, a neúplnost vyplnění formy. Na obrázku 1.2 přílohy VII se na odlitku neobjeví žádné bubliny, ale nebyla vyplněná forma. V příloze VIII na obr. 1.3, obr. 1.4 a v příloze IX obr. 1.5 nejsou téměř žádné bubliny a odlitky jsou výborně vyplněny.

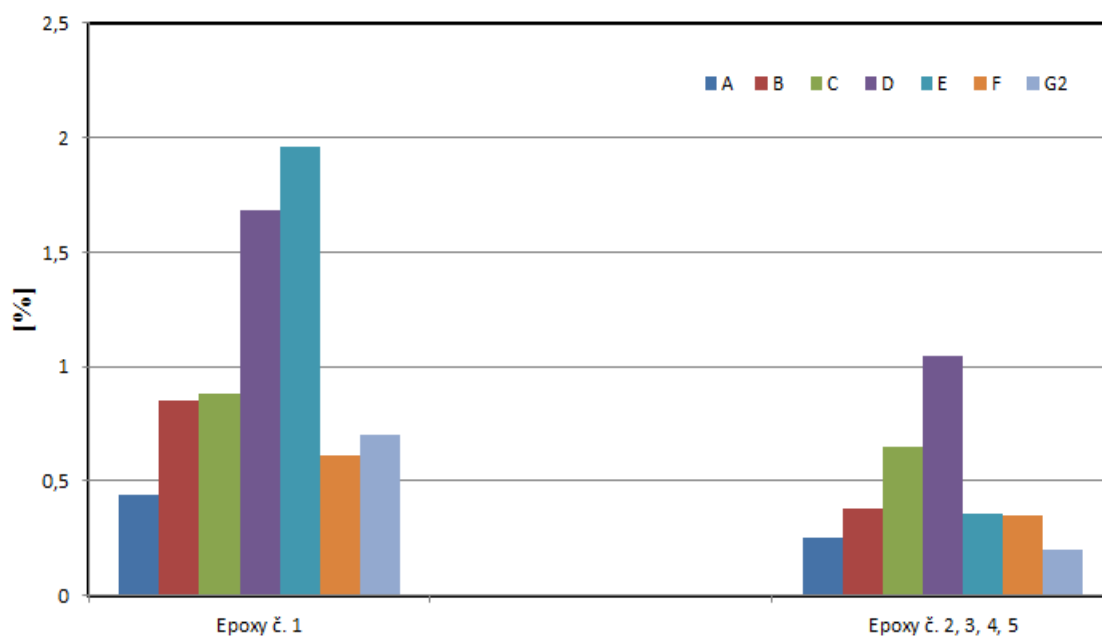
Podobně odlitky z epoxidové pryskyřice, na obrázku 1.6 přílohy IX má hodně bublin na povrchu a na obrázcích 1.7, 1.8 (příloha X), 1.9, 1.10 (příloha XI) se neobjevují žádné bubliny a všechny odlitky vyplnily formu dokonale, protože byla dlouhá doba pro zpracování a zatečení materiálu (až 20 hodin).



## 9.2 Vyhodnocení přesnosti rozměrů odlitků



Graf. 1.: Procentuální rozdíl rozměrů odlitků ze sádry oproti master modelu.



Graf. 2.: Procentuální rozdíl rozměrů odlitků z epoxidu oproti master modelu.

Graf srovnává každý rozměr, pro každý rozměr je jiná barva. Díky tomuto ukazateli zjistíme rozdílnost jednotlivých odlití. V grafech (graf. 1 a graf. 2) jsou porovnány procentuální rozdíly rozměrů odlitek od master modelu. Z grafu je možno vyčíst, že nejnižší odchylka rozměrů od master modelu byla při odlévání ve vakuu a že odlitky vytvrzené při pokojové teplotě jsou přesnější.

### **9.3 Vyhodnocení postupu lití**

V této části došlo k vyhodnocení významných faktorů, které ovlivňují proces lití. Mezi tyto faktory patří doba míchání směs, vyplnění dutiny formy materiálem a doba tuhnutí odlitek. Veškeré tyto vlivy byly u všech takřka stejné a dalo by se tvrdit, že mezi nimi nebyly rozdíly. Při docílení podtlaku se nechá směs mísit do doby, dokud se neodstraní všechny bubliny z materiálu. Míchání směsi ve vakuu trvalo přibližně 3 minuty. Tekuté materiály bez problému vyplňovaly celý objem dutiny formy bez ohledu na jejich konsistenci.

## **10. ZÁVĚR**

Tato bakalářská práce byla vyhotovena za účelem zjištění výhodnosti a nevýhodnosti lití netradičních materiálů ve vakuu. Díky získaným poznatkům můžeme dosáhnout nejvhodnějších podmínek pro odlévání těchto materiálů. V teoretické části této práce byly vybrány materiály sádra a epoxidová pryskyřice. V experimentální části byly zjišťovány nejvhodnější podmínky pro lití těchto materiálů, to byl podtlak a způsob promíchání. Provádění lití bez vakua, ve vakuu, při pokojové teplotě a v peci, kterou udával výrobce.

Z práce vyplynulo, že nejvhodnější odlévání je ve vakuu. Při těchto podmínkách vyplnily materiály nejlépe dutiny formy. Povrch odlitku byl dobrý bez výrazných povrchových vad. Za nejvhodnější proces lití obecně by se podle zjištěných výsledků dal považovat následující postup. Míchání materiálů mimo komoru ručně, a pak vakuovat pro uvolnění vzduchu ze směsi. To potrvá až do té doby, než bude frekvence výskytu vzduchových bublin na povrchu taveniny minimální. Následně se tekutý materiál odlije a po vpuštění vzduchu do komory se odlitek nechá vytvrdit.

Mezi nevýhody této metody patří omezená velikost odlitku. Zejména výroba modelu je jednou z nejdražších součástí této technologie. Z toho vyplývá, že je používána pro hromadnou a sériovou výrobu, kde se náklady vložené do výroby modelu a formy vrátí.

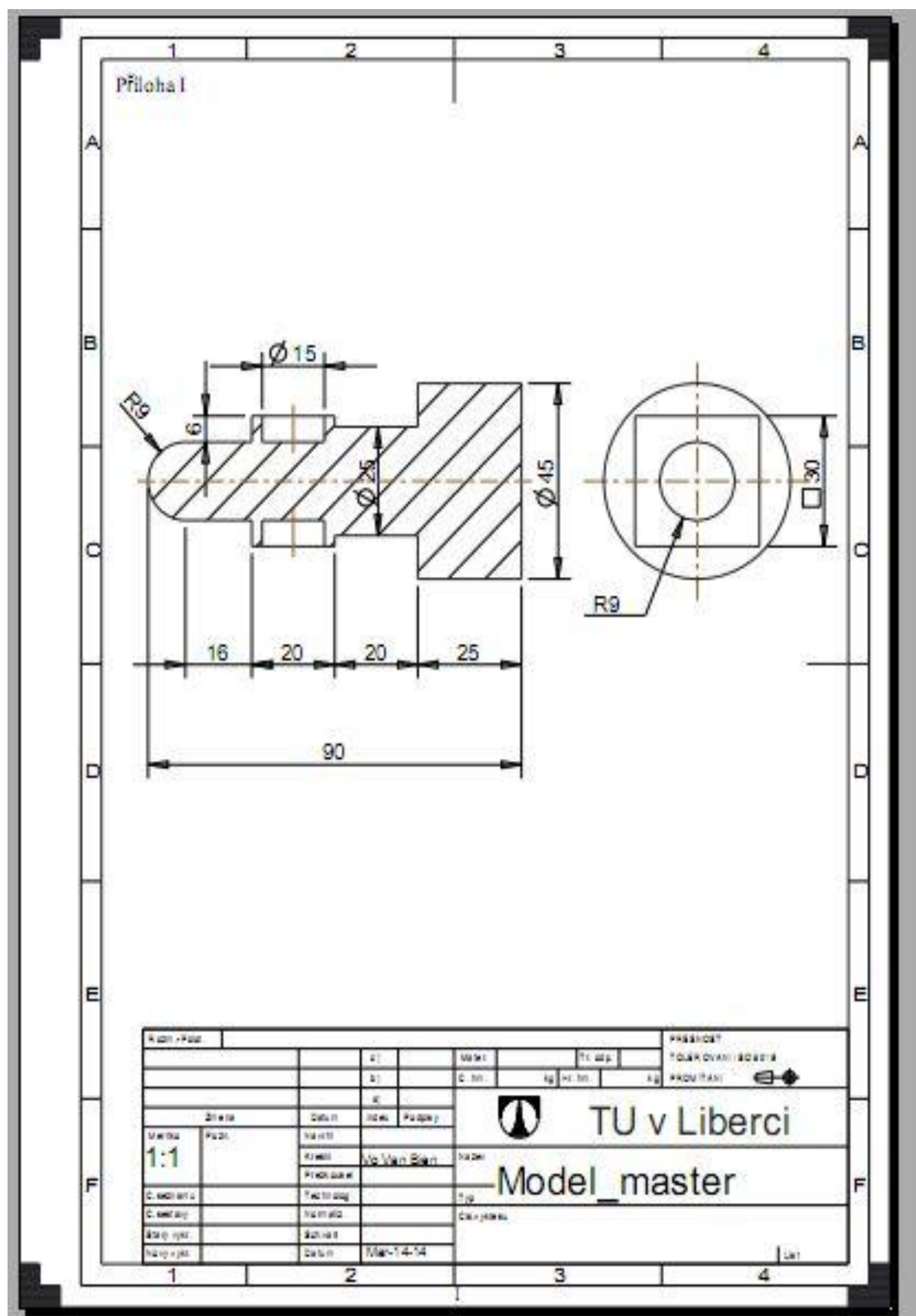
## **Seznam použité literatury**

- [1] Aplikace moderních technologií pro výrobu předního dílu upínacího systému horolezecké mačky [online]. 2014 [cit 2014-2-15] Dostupné z WWW: <<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/27432/Bakal%C3%A1%C5%99sk%C3%A1%20pr%C3%A1ce%20ve%C5%99ejn%C3%A1.pdf?sequence=1>>.
- [2] Vakuové lití [online]. 2014 [cit 2014-3-2] Dostupné z WWW: <<http://www.evektor.cz/vakuove-liti.aspx>>.
- [3] MK vakuové [online]. 2014 [cit 2014-3-9] Dostupné z WWW: <<http://www.mcae.cz/vakuove-lici-systemy>>.
- [4] Vlastnosti sádra [online]. 2014 [cit 2014-3-10] Dostupné z WWW: <<http://ptc.zshk.cz/vyuka/sadra.aspx>>.
- [5] Vlastnosti epoxidové pryskyřice [online]. 2014 [cit 2014-3-11] Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1\\_prysky%C5%99ice](http://cs.wikipedia.org/wiki/Epoxidov%C3%A1_prysky%C5%99ice)>.
- [6] BOUBLÍK, Vlastimil. *Lití plastických hmot pro modeláře*. Vyd. 1. Praha : SNTL, 1966. Licí hmoty, s. 94-101. L16p-E1-IV-32/10281MII.
- [7] Silikon kaučku [online]. 2014 [cit 2014-3-16] Dostupné z WWW: <<https://www.xiameter.com>>.
- [8] Produkty sádra [online]. 2014 [cit 2014-3-19] Dostupné z WWW: <[http://www.kittfort.cz/products\\_1\\_13.htm](http://www.kittfort.cz/products_1_13.htm)>.
- [9] Firma : TORTEN s.r.o. Tel./Fax. Wolkerova 1749 00420 491 421 775/ 491 422 012. 547 01 Náchod e-mail:info@torten.cz .

## **Seznam příloh**

Příloha I: Výrobní výkres Master modelu .....	I
Příloha II: Tabulky měření hodnoty odlitků ze sádry č. 1 (23 °C) a (90 °C).....	II
Příloha III: Tabulky měření hodnoty odlitků ze sádry č. 2 (23 °C) a (90 °C) .....	III
Příloha IV: Tabulky měření hodnoty odlitků ze sádry č. 3, 4, 5 (23 °C) a (90 °C) .....	IV
Příloha V: Tabulky měření hodnoty odlitků z epoxidové pryskyřice č. 1 .....	V
Příloha VI: Tabulky měření hodnoty odlitků z epoxidové pryskyřice č. 2, 3, 4, 5.....	VI
Příloha VII: Fotografie odlitků ze sádry č. 1 a č. 2.....	VII
Příloha VIII: Fotografie odlitků ze sádry č. 3 a č. 4 .....	VIII
Příloha IX: Fotografie odlitků ze sádry č. 5 a odlitků z epoxidové pryskyřice č. 1 .....	IX
Příloha X: Fotografie odlitků z epoxidové pryskyřice č. 2, 3 .....	X
Příloha XI: Fotografie odlitků z epoxidové pryskyřice č. 4, 5 .....	XI

## **Příloha I: Výrobní výkres Master modelu**



**Příloha II: Tabulky měření hodnoty odlitků ze sádry č. 1 (23 °C) a (90 °C)**

Sádra číslo 1 (23 °C) – Licí sádra bez vakua					
Chladnutí při pokojové teplotě					
Licí teplota [°C]	23				Rozdíl rozměru <sup>1</sup> [%]
Teplota prostředí <sup>2</sup> [°C]	23				-
Model	1.1				-
Měření	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota	-
A [mm]	89,61	89,57	89,55	89,577	0,448
B [mm]	44,97	44,96	44,93	44,954	0,044
C [mm]	29,97	29,91	29,95	29,943	0,156
D [mm]	17,96	17,9	17,92	17,927	0,352
E [mm]	14,83	14,84	14,83	14,834	0,932
F [mm]	25,62	25,65	25,69	25,654	2,695
G1 [mm]	5,69	5,67	5,68	5,680	4,905
Sádra číslo 1 (90 °C) – Licí sádra bez vakua					
Chladnutí v peci					
Licí teplota [°C]	23				Rozdíl rozměru <sup>1</sup> [%]
Teplota prostředí <sup>2</sup> [°C]	23				-
Model	1.2				-
Měření	1.měření	2.měření	3.měření	Průměrná hodnota	-
A [mm]	89,54	89,48	89,49	89,503	0,529
B [mm]	44,96	44,91	44,95	44,940	0,073
C [mm]	29,87	29,84	29,89	29,867	0,411
D [mm]	17,77	17,75	17,79	17,770	1,223
E [mm]	14,83	14,82	14,81	14,82	1,021
F [mm]	25,51	25,53	25,57	25,537	2,228
G1 [mm]	5,59	5,62	5,63	5,614	6,021

<sup>1</sup> Kladné hodnoty rozdílů představují zmenšení rozměru odlitku oproti master modelu.

<sup>2</sup> Teplota prostředí, ve kterém forma s odlitkem chladne, v okamžiku bezprostředně po odlití.

**Příloha III: Tabulky měření hodnoty odlitků ze sádry č. 2 (23 °C) a (90 °C)**

Sádra číslo 2 (23°C) – Licí sádra vakuu bez smíchání					
Chladnutí při pokojové teplotě					
Licí teplota [°C]	23				Rozdíl rozměru <sup>1</sup> [%]
Podtlak [bar]	-0,95				-
Teplota prostředí <sup>2</sup> [°C]	23				-
Model	1.3				-
Měření	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota	-
A [mm]	89,61	89,57	89,59	89,590	0,433
B [mm]	44,91	44,9	44,92	44,910	0,141
C [mm]	29,85	29,87	29,86	29,860	0,434
D [mm]	17,83	17,82	17,83	17,826	0,907
E [mm]	14,84	14,87	14,84	14,850	0,821
F [mm]	24,77	24,79	24,77	24,776	0,814
G1 [mm]	5,71	5,72	5,71	5,714	4,347
Sádra číslo 2 (90°C) – Licí sádra vakuu bez smíchání					
Chladnutí v peci					
Licí teplota [°C]	23				Rozdíl rozměru <sup>1</sup> [%]
Podtlak [bar]	-0,95				-
Teplota prostředí <sup>2</sup> [°C]	23				-
Model	1.4				-
Měření	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota	-
A [mm]	89,58	89,57	89,59	89,580	0,445
B [mm]	44,83	44,84	44,87	44,846	0,281
C [mm]	29,81	29,82	29,81	29,813	0,589
D [mm]	17,79	17,8	17,79	17,793	1,093
E [mm]	14,81	14,82	14,79	14,806	1,111
F [mm]	24,71	24,75	24,72	24,726	1,014
G1 [mm]	5,73	5,74	5,72	5,730	4,068

<sup>1</sup> Kladné hodnoty rozdílů představují zmenšení rozměru odlitku oproti master modelu.

<sup>2</sup> Teplota prostředí, ve kterém forma s odlitkem chladne, v okamžiku bezprostředně po odlití.



**Příloha IV: Tabulky měření hodnoty odlitků ze sádry č. 3, 4, 5 (23 °C) a (90 °C)**

Sádra číslo 3, 4, 5 (23 °C) - Licí sádra vakuu s smíchaním					
Chladnutí při pokojové teplotě					
Licí teplota [°C]	23				Rozdíl rozměru <sup>1</sup> [%]
Podtlak [bar]	-0,95				-
Teplota prostředí <sup>2</sup> [°C]	23				-
Model	1.5	1.6	1.7		-
Měření	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná střední	-
A [mm]	89,6	89,62	89,59	89,604	0,418
B [mm]	44,92	44,95	44,95	44,940	0,074
C [mm]	29,85	29,93	29,89	29,890	0,334
D [mm]	17,85	17,89	17,83	17,856	0,741
E [mm]	14,89	14,91	14,91	14,904	0,465
F [mm]	24,79	24,81	24,75	24,784	0,787
G1 [mm]	5,73	5,72	5,78	5,743	3,845
Sádra číslo 3, 4, 5 (90 °C) – Licí sádra vakuu s smíchaním					
Chladnutí v peci					
Licí teplota [°C]	23				Rozdíl rozměru <sup>1</sup> [%]
Podtlak [bar]	-0,95				-
Teplota prostředí <sup>2</sup> [°C]	23				-
Model	1.8	1.9	1.10		-
Měření	1. měření	2. měření	3. měření	Průměrná střední	-
A [mm]	89,62	89,67	89,71	89,667	0,348
B [mm]	44,89	44,91	44,91	44,903	0,154
C [mm]	29,81	29,91	29,85	29,856	0,445
D [mm]	17,82	17,85	17,81	17,826	0,907
E [mm]	14,85	14,87	14,86	14,860	0,754
F [mm]	24,72	24,78	24,71	24,736	0,974
G1 [mm]	5,78	5,77	5,81	5,786	3,119

<sup>1</sup> Kladné hodnoty rozdílů představují zmenšení rozměru odlitku oproti master modelu.

<sup>2</sup> Teplota prostředí, ve kterém forma s odlitkem chladne, v okamžiku bezprostředně po odlití.

**Příloha V: Tabulky měření hodnoty odlitků z epoxidové pryskyřice č. 1**

Epoxidová pryskyřice odlitek číslo 1 – Lití bez vakua					
Chladnutí při pokojové teplotě					
Licí teplota [°C]	23				Rozdíl rozměru <sup>1</sup> [%]
Teplota prostředí <sup>2</sup> [°C]	23				-
Model	1.11				-
Měření	1.měření	2. měření	3. měření	Průměrná hodnota	-
A [mm]	89,57	89,6	89,59	89,586	0,437
B [mm]	44,57	44,59	44,61	44,590	0,851
C [mm]	29,72	29,71	29,75	29,726	0,878
D [mm]	17,66	17,69	17,71	17,686	1,686
E [mm]	14,68	14,65	14,71	14,680	1,956
F [mm]	24,86	24,83	24,79	24,826	0,613
G2 [mm]	6,16	6,15	6,16	6,157	0,698

<sup>1</sup> Kladné hodnoty rozdílů představují zmenšení rozměru odlitku oproti master modelu.

<sup>2</sup> Teplota prostředí, ve kterém forma s odlitkem chladne, v okamžiku bezprostředně po odlití.

**Příloha VI: Tabulky měření hodnoty odlitků z epoxidové pryskyřice č. 2, 3, 4, 5**

Epoxidová pryskyřice odlitek číslo 2, 3, 4, 5 – Lití ve vakuu						
Chladnutí při pokojové teplotě						
Licí teplota [°C]	23					Rozdíl rozměru <sup>1</sup> [%]
Teplota prostředí <sup>2</sup> [°C]	23					-
Podtlak [bar]	-0,95					-
Model	1.12	1.13	1.14	1.15	-	-
Měření	naměřené	naměřené	naměřené	naměřené	Průměrná střední	-
A [mm]	89,81	89,73	89,79	89,69	89,755	0,251
B [mm]	44,69	44,93	44,88	44,71	44,802	0,379
C [mm]	29,79	29,72	29,81	29,86	29,795	0,651
D [mm]	17,83	17,74	17,79	17,85	17,802	1,042
E [mm]	14,9	14,94	14,95	14,89	14,920	0,353
F [mm]	24,88	24,89	24,92	24,88	24,892	0,351
G2 [mm]	6,18	6,19	6,2	6,18	6,187	0,201

<sup>1</sup> Kladné hodnoty rozdílů představují zmenšení rozměru odlitku oproti master modelu.

<sup>2</sup> Teplota prostředí, ve kterém forma s odlitkem chladne, v okamžiku bezprostředně po odlití.

**Příloha VII: Fotografie odlitků ze sádry č. 1 a č. 2**

**1.1**



**1.2**

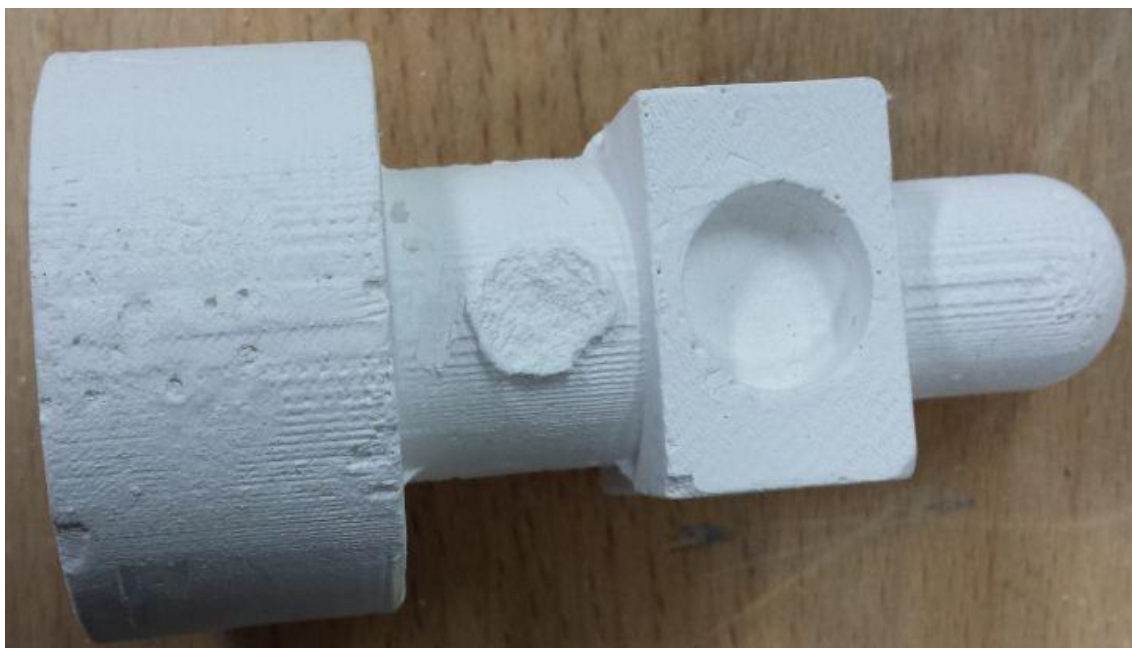


**Příloha VIII: Fotografie odlitků ze sádry č. 3 a č. 4**

**1.3**



**1.4**

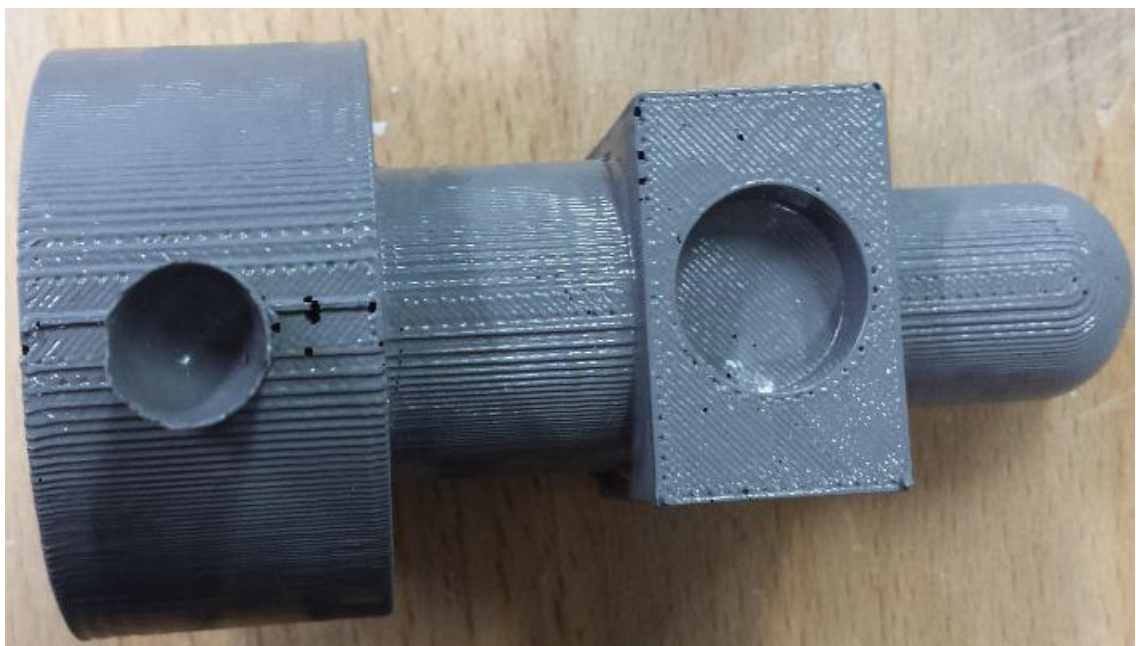


**Příloha IX: Fotografie odlitků ze sádry č. 5 a odlitků z epoxidové pryskyřice č. 1**

**1.5**



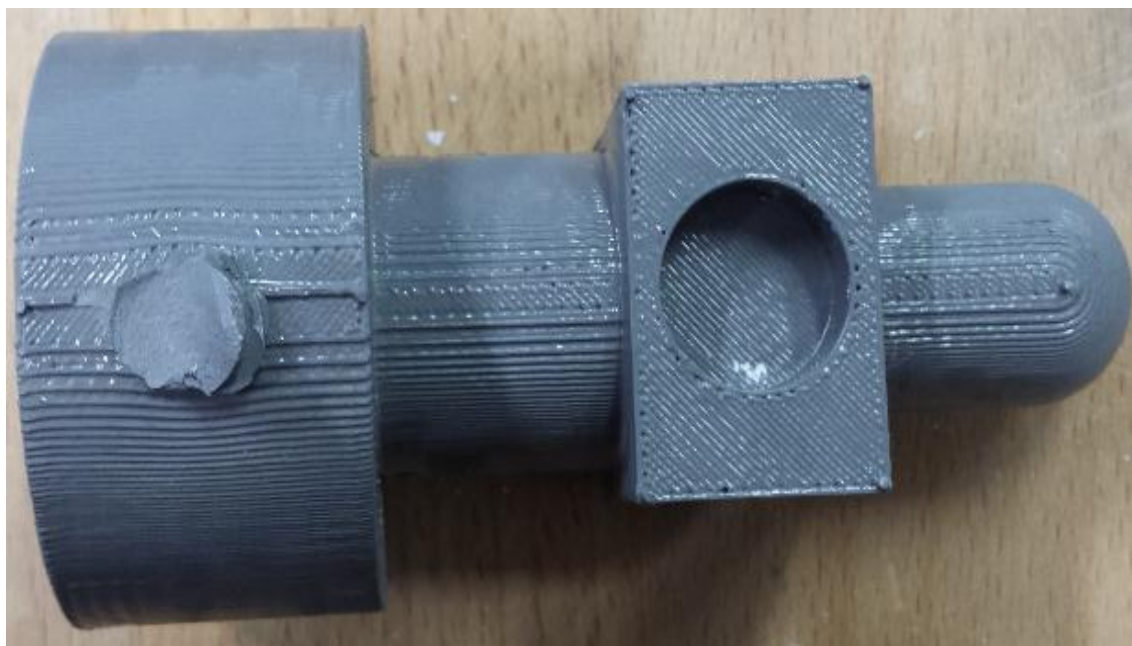
**1.6**



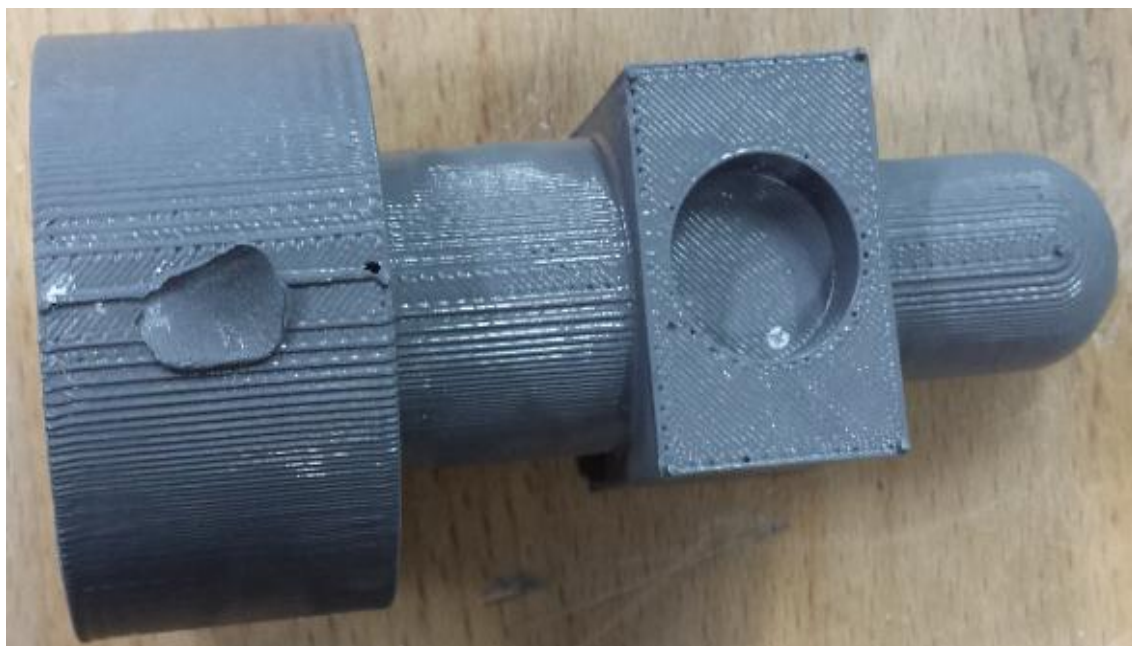


**Příloha X: Fotografie odlitků z epoxidové pryskyřice č. 2, 3**

**1.7**

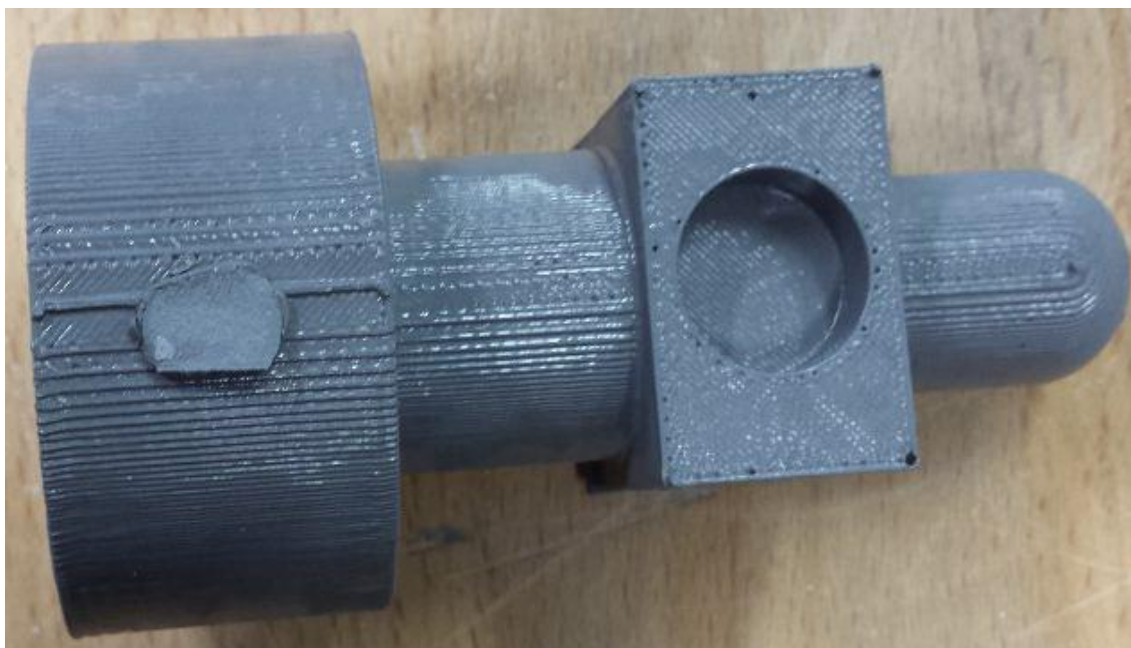


**1.8**



**Příloha XI: Fotografie odlitků z epoxidové pryskyřice č. 4, 5**

**1.9**



**1.10**

